加强喀斯特关键带长期观测研究，支撑西南石漠化区生态恢复与民生改善

王世杰* 彭 韬 刘再华 倪 健 陈 喜 张信宝 刘长成

中国科学院地球化学研究所 普定喀斯特生态系统观测研究站 安顺 550081

摘要 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站长期致力于我国西南喀斯特表生过程研究，研究成果揭示了贵州高原喀斯特生态系统物质循环规律及驱动力，论证了我国西南喀斯特碳、氮等营养元素和水循环过程与全球变化响应、反馈机制；剖析了喀斯特生态系统结构与功能、格局与过程，实现对石漠化发生、演变动力学机制的深刻解析，探明了喀斯特退化生态系统修复的途径和机理，并进行示范；针对喀斯特不同地质地貌类型区特点，构建了石漠化治理与生态恢复模式，为西南石漠化地区的生态恢复提供了基础理论和技术支撑。

关键词 喀斯特，生态系统，生态恢复，长期定位监测，石漠化

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200402002

中国南方喀斯特地区面积约 54 万平方公里，占世界陆地面积的 12%，是我国乃至全球陆地生态系统的重要组成部分；在全球三大喀斯特集中分布区中，其连片裸露碳酸盐岩面积最大。我国南方喀斯特地区是青藏高原隆起在南亚大陆亚热带气候区形成的一个海拔梯度大、地势格局复杂、生态脆弱的独特地理单元；同时，也是全球公认的受地质背景强烈制约的脆弱陆地生态系统[1,2]。在世界范围内具有典型性和代表性的我国南方喀斯特，与其他陆地地理单元相比，在水文地质结构、地球化学背景、物质循环过程，以及人类活动干扰方面具有其特殊性，主要表现为：地表土被薄且不连续，地上地下连通性好、水文过程变

* 通讯作者

资助项目：国家重大科学研究计划项目（2013CB956700），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA05070400），中国科学院科技服务网络计划（KFJ-EW-STS-093），中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目（KFJ-SW-YW009），国家自然科学基金中-英国际合作重大研究计划课题（41571130074）

修改稿收到日期：2020年6月30日

化迅速，水、土资源空间分布不匹配，水热因子高度时空异质性，氮、磷、钾极度缺乏的高钙/镁土壤环境，环境容量小、生态系统可恢复性难等[3]。这些特殊性造就了该地区石漠化等突出的生态环境问题，刘东生院士曾言，其在地球科学研究领域属于“难啃的骨头”。

中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站（以下简称“普定站”），紧密围绕喀斯特表生环境中岩-土-水-气-生 5 个子系统间物质运移和转化的生物地球化学过程等核心科学问题，根据喀斯特二元水文地质结构的特点，长期定位开展喀斯特表层地球系统的观测、研究和示范。自 20 世纪 80 年代开始，贵州普定作为国家“六五计划”全国岩溶区水资源攻关研究计划中的 4 个喀斯特研究区域（山西娘子关、贵州独山、贵州普定、广西都安）之一，就已经开展观测研究工作，至今该区域科学观测研究未曾中断过。积累的长达近 40 年的水文、水化学观测数据，记录着我国南方喀斯特典型区域陆表过程演变（石漠化土地退化和植被恢复）的环境变化信息。普定站长期的定位观测研究，为我国西南喀斯特地区的生态环境恢复和石漠化治理，以及区域可持续发展提供了技术支撑和科学依据。

1 系统论证碳酸盐岩风化成土物源，阐明石漠化科学定义和内涵

（1）系统论证了碳酸盐岩风化成土物源。碳酸盐岩成土速率较慢，土壤剖面和空间分布受地貌演化阶段和喀斯特双层空间结构的控制。从区域层面系统性论证了碳酸盐岩原地风化成土 2 阶段模式与形成演化机制——碳酸盐岩风化壳形成伴随碳酸盐矿物的流失，酸不溶物残积形成土粒，经过漫长堆积作用形成现今红土风化壳[4,5]；并构建了喀斯特典型红土风化壳形成与演化模式，为揭示喀斯特生态系统稳定性与自维持机制提供了基础理论依据。从理论上阐明了喀斯特生态系统脆弱性的本质，揭示了喀斯特地区土壤资源总量少、不连续、水土空间不匹配的客观事实；从物源和地质背景角度，印证了石漠化与地质背景的密切内在关联性[6,7]。

（2）阐明石漠化科学定义和内涵。实现了对石漠化发生、演变的内外动力学机制的深刻解析，详细刻画了石漠化的科学定义和科学内涵，即：喀斯特石漠化是土地荒漠化的主要类型，以脆弱的生态地质环境为基础，以强烈的人类活动为外驱动力，以土地生产力退化为本质，以出现类似荒漠化景观为标志[8]。为遏制石漠化、缓解脆弱生态环境压力奠定了科学基础，促进了我国石漠化治理技术体系的形成；提出了新的石漠化科学定义及评价指标体系，包括石漠化现状（包括样地尺度、景观尺度、区域尺度）评价、石漠化作用评价、石漠化过程（即石漠化演变速率）评价、石漠化危害性评价、石漠化敏感性（危险性）评价等。系统性地从多空间尺度揭示了石漠化演变的时空规律，解析了不同地质背景、不同人类活动对石漠化的影响及程度，为石漠化分区、分级、分类治理提供了理论支撑[9-12]。

2 详细阐明了西南喀斯特碳循环过程，为石漠化区生态修复提供了理论支撑

揭示了陆生植物、水生植物均有利用无机碳源进行光合作用的新途径；发现了碳酸盐岩快速的风化作用与水生植物生物碳泵的耦合机制。揭示了碳酸盐风化碳汇的岩-土-水-气-生相互作用的生物地球化学过程、各圈层间碳交换的途径和通量。解析无机碳与有机碳在各个圈层的内在耦合关系，建立了喀斯特地区碳循环模式，明确了碳酸盐风化碳汇在区域碳汇中所占份额。这对于认知喀斯特地区碳汇的调控机理，评估喀斯特地区碳汇潜力及其对全球碳汇贡献具有重要意义[13]。

2.1 岩石风化碳汇效应

利用近 40 年普定站后寨河喀斯特典型流域长期观

测（图 1）数据，揭示了喀斯特地区植被恢复的双重碳汇效应。近 40 年来，该区域森林覆盖率增加（森林面积从 1.6% 增加到 18.9%）对流域产水量没有重大影响，而流域无机碳输出的浓度随森林面积的增加而增加。这是因为森林覆盖率增加提高了生物过程固碳量和岩溶风化所形成的碳汇量[14]。从全球尺度看，由碳酸盐溶解、全球水循环和陆地及海洋上的水生生物光合作用共同影响产生的碳汇（或称耦合水生光合作用的碳酸盐风化碳汇）份额不可忽视，每年 0.82 Pg。其中，0.47 $Pg\cdot a^{-1}$ 通过海上降水（0.23 $Pg\cdot a^{-1}$）和陆地河流（0.24 $Pg\cdot a^{-1}$）进入海洋，0.12 $Pg\cdot a^{-1}$ 再次释放进入大气，还有 0.23 $Pg\cdot a^{-1}$ 以有机碳的形式形成于陆地水生生态系统中（水生碳泵效应）。因此，该区域净碳汇是 0.71 $Pg\cdot a^{-1}$，约占全球遗失碳汇的 25%，或占人类活动排放碳总量的 9%。随着全球变暖引起的全球水循环的加强、人类活动排放 CO_2 和大气圈中碳酸盐粉尘的增加，以及造林地区的增多，碳汇也将增加。预计到 2100 年，全球变暖将会导致全球碳酸盐风化碳汇增加 21%，即 0.18 $Pg\cdot a^{-1}$。另外，水生生物光合作用对 DIC（溶解无机碳）的利用，使得由碳酸盐风化形成的大气碳汇以往被严重地低估至实际值的 1/3 左右，达 0.48 Pg $C\cdot a^{-1}$。从而使得其中碳酸盐风化碳汇占整个岩石风化碳汇达到 94%，而硅酸盐风化碳汇仅 6% 左右。

普定站相关研究系统性地解析了喀斯特作用碳汇效应、通量及驱动机制，引领国际岩石风化碳汇效应的研究，为陆地水生生态系统稳碳和固碳潜力与调控、岩石风化碳循环和全球遗失碳汇问题的解决提供了新的科学证据和理论支撑[15-17]。

2.2 南方喀斯特区土壤和植被碳储量与碳汇潜力

获得了南方喀斯特区土壤和植被碳储量与碳汇潜力原创数据和认识，推动了喀斯特地区土壤学和生态学方面的发展。

（1）土壤。喀斯特植被恢复碳汇潜力大，石漠化坡地自然恢复初期恢复速度快（图 2）。长期以来，由于喀斯特地区土壤高异质性，人们一直不了解喀斯特地区土壤有机碳含量空间变化规律[18]。通过 150 m×150 m 高密度网格方法，普定站建立典型流



图 1　普定站水 - 碳 - 氮通量模拟试验场

域尺度土壤有机碳储量估算方法，揭示了0—50 cm土层有机碳密度对全剖面的贡献率达69.97%[19]。提出充分考虑喀斯特山坝系统的特点和土壤厚度、岩石裸露率这2个关键指标修正土壤碳密度及储量估算，而传统方法将高估喀斯特地区土壤碳密度和储量近40%。利用此方法对贵州省喀斯特不同地貌类型区土壤有机碳储量进行估算，结果显示：坡度大于6°的喀斯特高原区土壤有机碳储量为0.14 Pg、峡谷区为0.05 Pg、槽谷区为0.17 Pg、断陷盆地区为0.02 Pg、峰丛洼地区为0.05 Pg；贵州全省喀斯特地区土壤有机碳总储量为0.96 Pg（其中坡度小于6°的地区为0.53 Pg，大于6°为0.43 Pg）；碳密度为72 Mg·ha^{-1}，明显低于全国平均碳密度（108 Mg·ha^{-1}）。

（2）植被。在植被研究方面，估算了典型流域地上植被碳储量与碳汇潜力，发现稀灌草丛、藤刺灌丛、乔灌过渡林、次生乔木林和近原始林的平均地上碳密度分别为：1.70、4.15、22.3、70.28和142.2 Mg·ha^{-1}[20]。退化喀斯特生态系统的碳储量由稀灌草丛的38.05 Mg·ha^{-1}增加到次生乔木林的150.65 Mg·ha^{-1}，表现出巨大的碳汇潜力[21]。喀斯特生态系统生产力较低[22]，物种分配上少数优势树种聚集了整个群落绝大部分的地上碳储量，喀斯特常绿落叶阔叶混交林的地上生物量、地下生物量和粗木质残体等总生物量低于常态地貌的亚热带常绿阔叶林，流域尺度的遥感估算也证实该观点；但根系生物量分配却具有独特的生态策略，更多资源被分配到地下，以迎合喀斯特高度异质性的严酷生境[23]。

上述野外观测研究不仅填补了喀斯特植被根系生物量观测的空白，也为估算喀斯特地区碳储量提供了可靠本底数据。鉴于退化喀斯特植被的分布面积广大，尽管喀斯特森林的碳密度较低，我国南方喀斯特石漠化区域的植被仍具有巨大固碳潜力。同时，从群落物种组成与谱系结构方面，揭示了喀斯特植被高落叶成分和适钙植物的独特性，形成典型的常绿落叶阔叶混交林，富含特有种，群落谱系结构聚集的特点[24,25]。研究成果也成为石漠化生态系统植被恢复潜力评估和物种优化配置的重要理论基础。

3 提出了喀斯特地表、地下“二维”水土流失方式，揭示喀斯特地区水土（养分）流失特点

根据岩土剖面的土壤蠕滑现象[26]，提出了地下漏失（地下流失）也是喀斯特坡地重要的土壤流失方式（图3）[27]。基于长期观测结果，采用多手段综合研究方法，获得了地面与地下流失量的可靠数据。

（1）在我国喀斯特地区率先利用全坡面大型





图2　普定站退耕样地
（a）2010年；（b）2016年

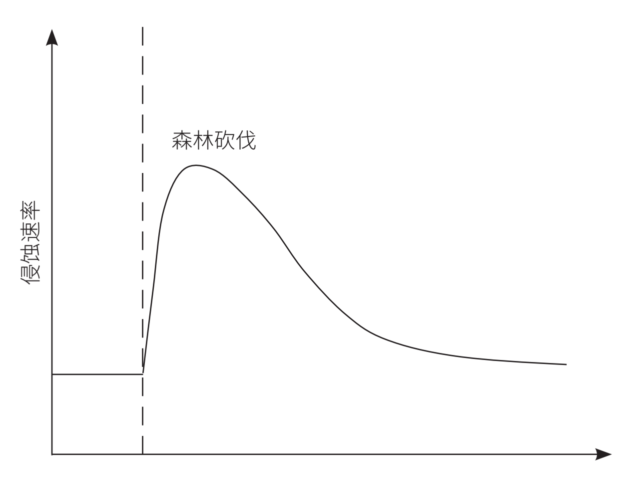


图3 喀斯特坡地水土流失发生在森林破坏短时期内[27]

径流场的方法，获得了坡地水土流失的可靠数据。喀斯特纯质石灰岩坡地年地表径流系数低，多为小于5%[28]，入渗强烈；年地表土壤流失量也非常小，不同土地利用类型坡地的地表土壤流失量变化为0.39—62.25 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ [29]。

（2）基于长期观测结果提出喀斯特地区坡面土壤和表层岩溶带蓄满产流机制，得出贵州喀斯特坡地坡面产流产沙阈值。在降雨量超过40 mm和最大降雨强度超过30 $mm \cdot h^{-1}$（独立性降雨）时产流、产沙，其中71.2%的径流通过岩溶裂隙、落水洞等向地下漏失[30]。

（3）根据洼地泥沙堆积厚度和洼地面积，得到贵州荔波和普定5个洼地流域1963年以来的产沙模数。原始森林植被未遭受破坏的岩溶山地的年土壤地面流失速率低于10 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$；森林植被遭受破坏的短期内（数年），土壤地面流失速率可高达数千至上万 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$；表层土壤大量流失后，土壤地面流失速率又急遽降低至小于10—100 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$。这揭示了森林短期破坏对水土流失的影响过程[31]。

（4）根据地质背景，确定了不同类型喀斯特坡地的合理流失量。连续性纯碳酸盐岩地区，总允许流失量20 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 左右，允许地面流失量5 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ [32]。

（5）基于观测和模型计算，评估了高原喀斯特典型流域水-氮通量特征。喀斯特高原典型流域农业施肥贡献了氮元素总输入量的86%，其中作物生长消耗了总输入量的45%；反硝化作用占28%，地下河流失约占10%，地表流失约占5%[33]。

（6）构建了石漠化山区路面集雨、沟渠引水、水池蓄水、高效节水“四位一体”的喀斯特表层水资源高效利用与科学调蓄技术体系，以及表层水资源空间优化配置的技术模式（图4）[34]。有效解决了喀斯特坡地入渗强烈、地表径流系数极低、农田干旱严重等问题，为喀斯特水土流失防治和表层水资源利用提供了理论依据，为解决喀斯特山区地表水资源不足的问题，改善石漠化地区的农业立地条件促进生态恢复和





图4 路-池集雨蓄水表层水资源高效综合利用技术
（a）普定梭筛万亩桃园；（b）“路-池”一体化集雨灌溉系统

农业产业结构调整奠定了基础。

4 构建西南喀斯特不同地质地貌类型区的石漠化治理恢复模式，助力石漠化区生态恢复与民生改善

以贵州为重点开展喀斯特高原地区的宏观尺度的政策研究。根据喀斯特地区地质背景制约下的自然资源禀赋空间分布、人类活动（如农、林方面的重大政策调整，生态工程，其他大型工程），建立了不同地质地貌类型区的石漠化治理恢复模式，明确了石漠化治理区域、目标、治理措施等，为具体的石漠化治理提供了科学指导。并针对喀斯特生态系统的六大类型的特点及其生态建设的主要方向，研发了喀斯特表层水资源开发利用、土壤改良、立体农业建设和产业化培育等系列技术体系；创建了高原型、峡谷型和槽谷型等不同地质地貌类型区的石漠化治理恢复模式，在乌蒙山区、武陵山区、滇黔桂石漠化山区等国家扶贫攻坚主战场等得到广泛应用和推广，为西南喀斯特地区的生态恢复提供了示范样板[20-23]。以石漠化为主题开展的研究工作被引次数近 3 000 次，引领了国内相关研究，推动了全国的喀斯特石漠化治理工作。

5 推动了表生系统过程研究和喀斯特地球关键带科学的发展

喀斯特地区在其特殊的地表和地下岩石土壤结构影响下，地球关键带多圈层（岩-土-水-气-生）物质循环快速、互馈作用显著（图 5）。也正是这些特点为短期内认识喀斯特关键带的功能与演化提供了有利研究条件，形成了“地球关键带”研究的天然实验室。利用现代化观测手段，通过高密度、高频率、自动化立体监测喀斯特关键带多要素的动态过程，开展不同尺度下控制性实验和模型集成研究。通过剖析喀斯特关键带物质能量通量的变化规律、循环过程以及驱动机制，揭示全球变化背景下喀斯特关键带的结构与功能、生态系统服务的格局与过程。探索在全球变化及人类活动背景下喀斯特关键带服务与管理模式，预测其演化趋势，以提升解决重大科学问题和国家、地区重大需求的能力，为国家和当地政府决策提供科技咨询；转化观测和研究成果，并开展试验示范，服务于国家、地区社会经济发展。普定站也通过积极推动贵州省人民政府-国家自然科学基金委员会联合资助“喀斯特科学研究中心”项目实施和中-英地球关键带计划项目的实施，并依托中国科学院科研基地型野外站重点设施建设项目，建成了喀斯特地球关键带观测研究平台，并进入中国生态系统研究网络（CERN）先期启动的地球关键带观测研究站网，引领了我国乃至世界喀斯特生态环境研究的学科发展。

6 结语

普定站始终围绕我国喀斯特地区生态文明建设的重大科技需求和全球变化下的地球系统科学发展需要，在喀斯特生物地球化学循环、生态恢复和石漠化治理方面取得了一批原创性创新成果。承担实施了

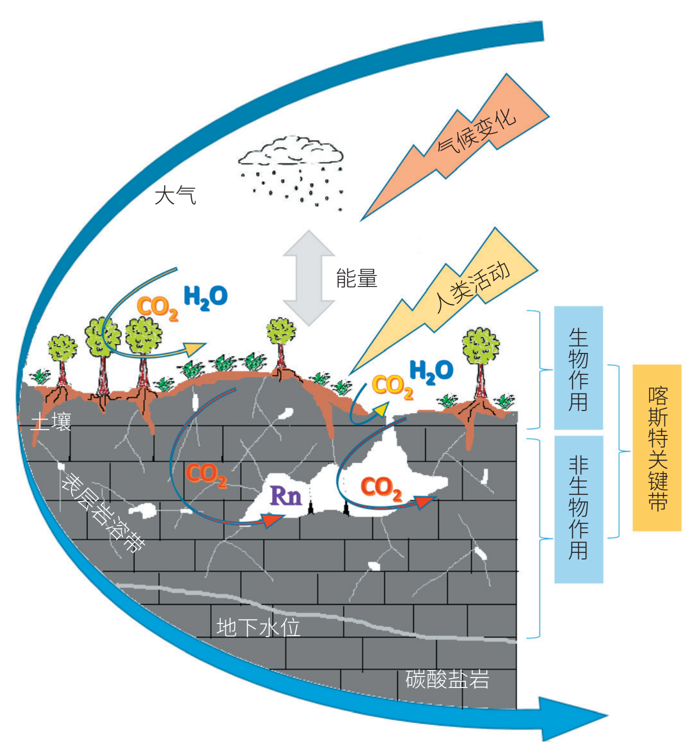


图 5　喀斯特关键带结构和碳交换过程示意图

我国有关喀斯特生态环境问题研究的第 1 个“973”项目、第 1 个全球变化重大研究计划项目和第 1 个国家自然科学基金创新研究群体项目；同时，也为国家《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲（2008—2015 年）》的制定提供科学依据，为石漠化治理技术体系建立发挥了重要作用。通过长期开展喀斯特表生系统过程研究，为喀斯特地区生态恢复和生态文明建设提供了理论基础，建立研发了石漠化治理技术支撑体系，为区域经济社会可持续发展提供了重要的科技支撑。自 2009 年纳入 CERN 管理以来，获得省部级奖励 4 项，在国内外知名刊物发表论文近 400 篇（其中 SCI 论文 180 余篇），以及出版专著 3 部等，在国内外产生了重要影响。展望未来，我们坚信普定站将努力建设成为国际一流的喀斯特野外科学观测研究站，也将努力打造成为一流的集科学研究、人才培养、公众教育培训为一体的野外基地，持续助力贵州和西南喀斯特地区生态文明建设。

致谢　感谢中国科学院科技促进发展局杨萍为文章撰写提出的建议，感谢中国科学院地球化学研究所白晓永、赵敏、刘秀明、罗维均和河海大学张志才提供的部分图件和数据支持。

参考文献

1 Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.

2 Wang S J, Li R L, Sun C X, et al. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China: Phenomena and mechanisms. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 123-131.

3 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.

4 王世杰, 孙承兴, 冯志刚, 等. 发育完整的灰岩风化壳及其矿物学和地球化学特征. 矿物学报, 2002, 22(1): 19-29.

5 Ji H B, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau I. The formation of the Pingba profile. Chemical Geology, 2004, 203(1-2): 1-27.

6 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, (6): 573-582.

7 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.

8 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, (2): 31-35.

9 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题. 中国岩溶, 2005, (3): 192-195.

10 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议. 地球与环境, 2007, 35(2): 188-192.

11 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点. 山地学报, 2013, 31(1): 18-24.

12 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. 山地学报, 2015, 33(6): 641-648.

13 王世杰, 刘再华, 倪健, 等. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展. 地球与环境, 2017, 45(1): 2-9.

14 Yan J, Wang W, Zhou C, et al. Responses of water yield and dissolved inorganic carbon export to forest recovery in the Houzhai karst basin, southwest China. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2082-2090.

15 Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3-4): 162-172.

16 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望. 科学通报, 2012, 57(Z1): 95-102.

17 Zeng S, Liu Z, Kaufmann G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. Nature Communications, 2019, 10: 5749.

18 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法. 土壤学报, 2007, (3): 475-483.

19 Zhang Z, Zhou Y, Wang S, et al. The soil organic carbon stock and its influencing factors in a mountainous Karst basin in P. R. China. Carbonate Evaporite, 2019, 34: 1031-1043.

20 Liu C, Liu Y, Guo K, et al. Mixing litter from deciduous and evergreen trees enhances decomposition in a subtropical karst forest in southwestern China. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 44-54.

21 Liu Y, Liu C, Wang S, et al. Organic carbon storage in four ecosystem types in the Karst region of Southwestern China. PLoS One, 2013, 8(2): e56443.

22 Ni J, Xu H, Liu L. Low net primary productivity of dominant tree species in a karst forest, southwestern China: First evidences from tree ring width and girth increment. Acta Geochimica, 2017, 36(3): 482-485.

23 Liu L, Ni J, Zhong Q, et al. High mortality and low net change in live woody biomass of karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Southwestern China. Forests, 2018, 9(5): 263.

24 Ni J, Luo D H, Xia J, et al. Vegetation in karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots. Solid Earth, 2015, 6(3): 799-810.

25 Liu C, Liu Y, Guo K, et al. Aboveground carbon stock, allocation and sequestration potential during vegetation recovery in the karst region of southwestern China: A case study at a watershed scale. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 235(1): 91-100.

26 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.

27 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.

28 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.

29 彭韬, 杨涛, 王世杰, 等. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报. 地球与环境, 2009, 37(2): 126-130.

30 Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. Catena, 2012, 90: 53-62.

31 张信宝, 白晓永, 刘秀明. 洼地沉积的^{137}Cs法断代测定森林砍伐后的喀斯特小流域土壤流失量. 中国科学：地球科学, 2011, 41(2): 265-271.

32 白晓永, 王世杰. 岩溶区土壤允许流失量与土地石漠化的关系. 自然资源学报, 2011, 26(2): 1315-1322.

33 Zhang Z, Chen X, Cheng Q, et al. Coupled hydrological and biogeochemical modelling of nitrogen transport in the karst critical zone. The Science of the total environment, 2020, 732: 138902.

34 Qin L, Bai X, Wang S, et al. Major problems and solutions on surface water resource utilisation in karst mountainous areas. Agricultural Water Management, 2015, 159: 55-65.

Strengthen Karst Surface Systematic Processes Research, Support Ecological Restoration and Social Improvement in Karst Rocky Desertification Areas in Southwest China

WANG Shijie* PENG Tao LIU Zaihua NI Jian CHEN Xi ZHANG Xinbao LIU Changcheng

(Puding Karst Ecosystem Research Station, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Anshun 550081, China)

Abstract The Puding Karst Ecosystem Research Station has been committed to researching karst surface systematic processes in Southwest China. Its research endeavors have revealed material circulation and driving forces in the ecosystems of the Karst plateau and demonstrated carbon cycling process response and feedback mechanism to global change. The present research explores the structures, functions, patterns, and processes of karst ecosystems, analyzes the dynamic mechanism of karst rocky desertification, and provides the basic theory and technical support for the restoration of degraded karst ecosystems. According to the characteristics of different geological karst regions, different types of approach were established for the control of karst rocky desertification and ecological restoration, which provided the basic theory and technical support for the ecological restoration of rocky desertification in Southwest China.

Keywords karst, ecosystem, ecological restoration, long-term monitoring, karst rocky desertification



王世杰 贵州省人民政府副省长，民革中央常委、贵州省委主委，中国科学院地球化学研究所副所长，中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站站长。中国矿物岩石地球化学学会副理事长，中国第四纪研究会理事，中国地质学会岩溶地质专业委员会委员，中国探月工程科学研究委员会月面环境专业委员会主任委员。“973”项目首席科学家，贵州省核心专家，享受国务院特殊津贴专家，中国科学院“西部之光”计划入选者，全国优秀科技工作者（2012 年）。在国内外核心刊物上已发表论文 400 余篇（SCI 论文 60 余篇），合作编著著作 8 部。《地球与环境》主编，《化学通报》《矿物学报》《中国岩溶》《矿物岩石》《矿物岩石地球化学通报》及 *Chinese Journal of Geochemistry* 编委。E-mail: wangshijie@vip.gyig.ac.cn

WANG Shijie Vice Governor of Guizhou Province, Chairman of Guizhou Provincial Committee of the Revolutionary Committee of the Chinese Kuomintang, Deputy Director of the Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Director of Puding Karst Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences, principal investigator of the National Program on Key Basic Research Project, one of the core experts of Guizhou Province, and government special allowance expert. He won the National Outstanding Scientific and Technological Workers Award in 2012. He has been working on karst ecological environment research and had published more than 400 peer-reviewed academic papers. He currently serves as the Vice Director of the Chinese Society of Mineralogy, Petrology, and Geochemistry and a member of the Committee of Chinese Association for Quaternary Research, Committee of Karst Geology of the Geological Society of China, China Lunar Exploration Engineering Science Research Committee. He also serves as the Editor-in-Chief of *Earth and Environment* and editorial board member of the *Chemistry Bulletin, Chinese Journal of Geochemistry*, *Acta Mineralogica Sinica, Carsologica Sinica*, *Acta Petrologica Sinica*, *Bulletin of Mineralogy*, and *Petrology and Geochemistry*.
E-mail: wangshijie@vip.gyig.ac.cn

■责任编辑：文彦杰